

Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Energietechnik,
Professur Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung

VERGASUNG UND VERBRENNUNG VON BIOMASSE FÜR DEN DEZENTRALEN ANWENDUNGSBEREICH

1 Einleitung

Mit dem durch die Bundesregierung formulierten Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung und den darin beschriebenen Aufgabenstellungen ist bei der Erarbeitung neuer Strategien insbesondere die energetische Nutzung von Biomasse im Energiemix der erneuerbaren Energien in den Fokus getreten.

Die Zielsetzungen, Strategien und Maßnahmen sind im Nationalen Biomasse-Aktionsplan für Deutschland - Beitrag der Biomasse für eine nachhaltige Energieversorgung - verankert. Vor dem Hintergrund der Bewertung und des Ausbaus von Biomasse in der Energieversorgung sind im Aktionsplan folgende zwei Zielstellungen besonders zu beachten:

1. Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromversorgung soll bis 2020 auf mindestens 30 % gesteigert werden.
2. Der Anteil der Wärme aus erneuerbaren Energien soll von derzeit 11 % auf 14 % bis 2020 steigen.

Bei der Diskussion über die Nutzungspfade der Biomasse müssen komplexe Fragestellungen beantwortet werden. Ein wesentlicher Faktor bei der Entscheidungsfindung ist die Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit der einzelnen Nutzungsmöglichkeiten. Neben der Effizienz wird aber auch vor dem Hintergrund der energetischen Nutzung von Biomasse mit dem kontinuierlichen Ausbau der erneuerbaren Energien eine Optimierung der Netzinfrastruktur und der Speichertechnologien erforderlich. Besonders im Hinblick auf die starken Fluktuationen der Energieträger Wind und Sonne besteht die Aufgabe mit Hilfe von flexiblen Stromversorgungssystemen diese Schwankungen auszugleichen.

Der vorliegende Beitrag konzentriert sich bei den Eckdaten bezüglich der Energieversorgung durch erneuerbare Energien in:

1. der Art der Erneuerbaren Energie auf die *biogene Festbrennstoffe*,
2. der Form der Endenergiebereitstellung auf die Sparten *Strom und Wärme*,
3. den thermochemischen Konversionsverfahren auf die *Vergasung und Verbrennung* und
4. dem Anwendungsbereich auf die *dezentrale Energieversorgung*.

2 Aktuelle Situation der Energieversorgung auf Basis von erneuerbaren Energien

In den vergangenen beiden Jahrzehnten wurde der Anteil an erneuerbaren Energien im Energiemix in Deutschland stark ausgebaut. Biomasse, insbesondere Holz, nimmt hierbei eine besondere Stellung ein, da die Energiebereitstellung nicht wie bei Wind und Sonne mit Fluktuationen behaftet ist. Strom und Wärme aus Biomasse ist somit grundlastfähig. Die Nutzung von erneuerbaren Energien muss weiter ausgebaut werden. In Bild 1 wird der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2011 dargestellt [1].

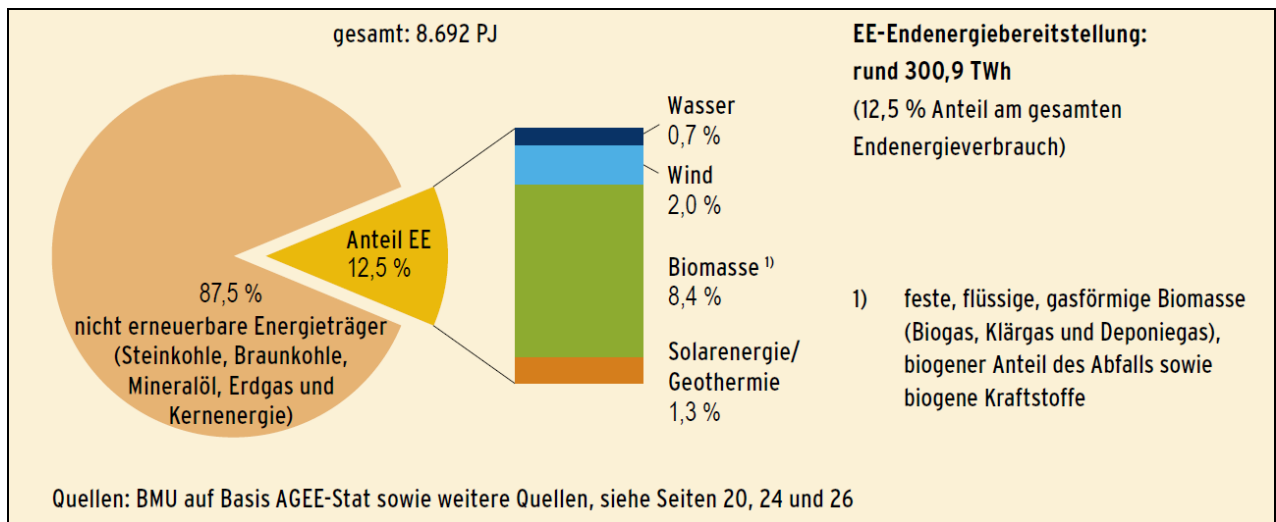


Bild 1: Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2011 [1]

Die Bundesrepublik verfolgt mit ihrem Energiekonzept entsprechende Ziele, für die allerdings noch Handlungskonzepte entwickelt werden müssen. So wird in [2] angegeben, dass die Bundesregierung bis 2020 einen Anteil an erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch von 18 % anstrebt. Im Jahr 2010 lag der Anteil am gesamten Endenergieverbrauch aus erneuerbaren Energie bei 10,9 %. Das entspricht einer Arbeit von 275 TWh [3]. Eine positive Tendenz ist vor dem Hintergrund des Umwelt- und Klimaschutzes mit der Verringerung des absoluten Endenergieverbrauchs in Deutschland vom Jahr 2010 zum Jahr 2011 von ca. 4 % zu verzeichnen.

In [1] werden als erneuerbare Energieträger Biomasse, Wasserkraft, Windkraft, Photovoltaik und Solarthermie/Geothermie erhoben, wobei der Anteil der Biomasse 8,4 % betrug. Für die Berechnung des gesamten Endenergieverbrauchs werden in [1] die Sparten Strom, Wärme und Biokraftstoff bewertet. Die weiteren Ausführungen dieses Beitrages konzentrieren sich auf die Strom- und Wärmeerzeugung aus biogenen Festbrennstoffen. Der Anteil an biogenen Festbrennstoffen lag 2011 in der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bei 9,2 %. Das entspricht einer Arbeit von 11,3 TWh. In der Wärmeerzeugung nahmen die biogenen Festbrennstoffe einen Anteil von 68,1 % ein, was einer Arbeit von 98 TWh entspricht [1]. Dabei wurden 69 % der biogenen Festbrennstoffe in den Haushalten, 24 % in der Industrie und 7 % in Heizwerken und Heizkraftwerken eingesetzt. Die Entwicklung beim Einsatz von biogenen Festbrennstoffen zur Stromerzeugung und zur Wärmeerzeugung in Haushalten und Heiz- und Heizkraftwerken ist gegenüber dem Jahr 2010 leicht rückläufig, wobei es in der Stromerzeugung aus allen betrachteten erneuerbaren Energien von 2010 auf 2011 insgesamt einen Zuwachs um 19 % zu verzeichnen gilt. Der Zuwachs des Anteils an erneuerbaren Energien bei der Stromerzeugung ist im Wesentlichen der Steigerungsrate in der Nutzung von Biogas (31 %), der Windenergie (30 %) und der Photovoltaik (65 %) zuzuordnen.

Gerade im Sektor der Wärmeerzeugung nehmen die biogenen Festbrennstoffe eine bedeutende Stellung ein. Im vorliegenden Beitrag liegt der Fokus bezüglich der Inputbiomasse für die Konzepte zur Biomasse – Vergasung und – Verbrennung gerade auf diesen biogenen Festbrennstoffen. Der bekannteste und am häufigsten eingesetzte biogene Festbrennstoff ist Holz. Mit den o.a. Entwicklungen der erneuerbaren Energie am Strom- und Wärmemarkt und unter dem Gesichtspunkt der Zielstellungen der Bundesrepublik Deutschland stellt sich die Frage nach dem verfügbaren Potential bzw. dem in der Zukunft notwendigen Potential an biogenen Festbrennstoffen. In 2011 wurden durchschnittlich ca. 56,14 Mio. Raummeter Rundholz ohne Rinde eingeschlagen, wobei von 2010 auf 2011 die geschlagene Holzmenge um ca. 3 % zugenommen hat. Ein weiteres Potential steht mit Alt- oder Recyclingholz mit einer Menge von ca. 12 Mio. Raummeter pro Jahr zur Verfügung. Der energetischen Nutzung werden lt. [4] ca. 45 % der geschlagenen Holzmenge und des Alt- und Recyclingholzes zugeführt. Unter der Annahme, dass es sich bei den biogenen Festbrennstoffen ausschließlich um Holz handelt und dieses in Form von Holzhackschnitzeln

verwendet wurde, wurden im Jahr 2011 ca. 51 Mio. Schüttraummeter Holz für die energetische Nutzung eingesetzt. Das entspricht bei Einsatz des Holzes als Holzhackschnitzel einer Menge von 11,75 Mio. t. Um das Ziel der Bundesregierung in 2020 zu erreichen, werden unter Annahme eines konstanten Gesamtstrom- und Wärmeverbrauchs und der Gleichverteilung der erneuerbaren Energieträger und im speziellen der biogenen Festbrennstoffe wie im Jahr 2011 ca. 66,3 Mio. Schüttraummeter bzw. 15,3 Mio. t Holzhackschnitzel zur Erzeugung von Strom und Wärme benötigt. Das bedeutet eine Steigerung des Holzaufkommens um 30 %.

3 Biomasse als Primärenergieträger

Die Ausführungen hinsichtlich der Verfügbarkeit von Holz in Form von Frisch- oder Recyclingholz im Abschnitt 2 widerspiegelt die Notwendigkeit der Mobilisierung weiterer Biomassen für den Einsatz in Technologien zur Strom- und Wärmeerzeugung. Um diese Aufgabe zu lösen muss im Vorfeld dem Begriff biogener Festbrennstoff eine Definition zugeordnet werden. Nach der Herkunft sind biogene Festbrennstoffe zu unterteilen in:

- Ungezielte forstliche und forstwirtschaftliche Erzeugung,
- Intensiver landwirtschaftlicher Anbau,
- Landwirtschaftliche Produktion von mehrjährigen Pflanzen,
- Forstwirtschaftliche Haupt- und Nebenprodukte,
- Organische Abfälle,
- Getrennt gesammeltes Altholz und
- Sonstiges.

Diese Einteilung lässt zunächst eine Klassifizierung der biogenen Brennstoffe nach ihrer Herkunft in Rückstände/Nebenprodukte und Energiepflanzen zu. Neben der Herkunft wird im Wesentlichen zwischen holzartiger und halmgutartiger Biomasse unterschieden.

Nun steht die Frage, inwieweit die biogenen Festbrennstoffe potentialmäßig in der Lage sind, für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung in Deutschland beizutragen. Die FNR veröffentlichte in ihrem aktuellen Bericht *Basisdaten Bioenergie Deutschland August 2012* [6], dass im Jahre 2050 bis zu 23 % des Bedarfs an Wärme, Strom und Kraftstoffen aus einheimischer Biomasse in Form von Holz, Energiepflanzen, Stroh und Biogas gedeckt werden können.

Neben der Potentialfrage in Form der „körperlichen“ Verfügbarkeit der biogenen Festbrennstoffe ist als ein weiteres sehr wesentliches Kriterium die Verfügbarkeit geeigneter Anlagen für den Einsatzstoff biogene Festbrennstoffe zur Strom- und Wärmeerzeugung zu betrachten.

Für eine Beurteilung der technischen Verfügbarkeit bezogen auf die Einsatzfähigkeit der biogenen Festbrennstoffe in Vergasungs- und Verbrennungsanlagen ist es wesentlich die Inputstoffe hinsichtlich seiner chemischen, mechanischen, kalorischen und reaktionskinetischen Eigenschaften zu spezifizieren. Ausschlaggebend für eine sichere Bewertung ist die Betrachtung der charakteristischen Merkmale der biogenen Festbrennstoffe unter Beachtung der Komplexität zwischen Einsatzgebiet, Prozess und Apparat für die jeweiligen Inputströme.

Für den konventionellen Kraftwerksbereich zur Erzeugung von Strom und Wärme auf Basis des Energieträgers Kohle wurde im Laufe vieler Jahre eine Systematik entwickelt, welche sich heute für eine solche Bewertung des Brennstoffs Kohle etabliert hat. Es ist heute bekannt, dass der Brennstoff in den Kraftwerken nicht beliebig durch andere alternative Brennstoffe substituiert werden kann. Die Schwierigkeit bei der Beurteilung der Einsatzfähigkeit in Anlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung von biogenen Festbrennstoffen besteht darin, dass z. Zt. noch keine hinreichenden Erfahrungen mit prozessorientierten Bewertungsverfahren für diese Art von Einsatzstoffen existieren. Eine Übertragbarkeit des

Vorhandenen für die Anwendung auf Biomasse ist auf Grund der unterschiedlichen Struktur, Zusammensetzung und brennstoffkinetischen Eigenschaften nicht möglich.

Für die Beurteilung der brennstofftechnischen Eigenschaften von biogenen Festbrennstoffen und der Ableitung von Kriterien zur Auslegung, Modifizierung bzw. Optimierung von technischen Anlagen zur Vergasung und Verbrennung werden im Labormaßstab bzw. in der großtechnischen Anwendungen zahlreiche Untersuchungen durchgeführt [7], [8], welche es ermöglichen Aussagen über die Anlagenverfügbarkeit, die Freisetzung von Emissionen und den Wirkungsgrad zu treffen.

4 Verfahren zur Strom- und Wärmeerzeugung aus biogenen Festbrennstoffen

Zur Erzeugung von Strom und Wärme aus biogenen Festbrennstoffen stehen als thermische Konversionsverfahren die Pyrolyse, die Vergasung und die Verbrennung zur Verfügung. Die Pyrolyse wird in diesem Beitrag ausschließlich als Teilprozess der Vergasung und Verbrennung bzw. als Konditionierungsstufe der biogenen Einsatzstoffe zur Weiterverarbeitung in der Vergasung und Verbrennung behandelt. Die Pyrolyse als ein in sich geschlossener Prozess wird vordergründig zur Erzeugung der Produkte Kraft- und Chemierohstoffe eingesetzt, welche nicht Gegenstand dieser Betrachtungen sind.

Im Folgenden werden die Verfahren zur Vergasung und Verbrennung unter Nutzung von biogenen Festbrennstoffen zur Erzeugung der Zielenergien

- thermische Energie als Heiz- und Prozesswärme und
- elektrische Energie

im Detail erläutert. Bei der Beschreibung wird auf die einzelnen Prozessstufen der Verfahren eingegangen. Die Teilschritte Lagerung und Transport sind nicht Gegenstand dieses Beitrages, wobei für eine wirtschaftliche und energetische Bewertung eine Betrachtung dieser Module unerlässlich ist.

4.1 Konditionierung von biogenen Festbrennstoffen

Je nach Herkunft und Eigenschaften der biogenen Festbrennstoffe muss vor Einsatz dieser in thermischen Konversionsverfahren eine dem des eingesetzten thermischen Verfahrens und Apparates entsprechende Konditionierung erfolgen.

So wirkt sich in erster Linie grundsätzlich ein hoher Wassergehalt der Brennstoffe negativ auf die Effizienz der thermischen Verfahren aus. Für die Vergasung werden optimale Inputwassergehalte für die Biomasse zwischen 10 % und 15 % angegeben. Neben der effizienten Prozessgestaltung ist ein gewisser Wassergehalt für die optimalen Reaktionsabläufe in der Vergasung Voraussetzung, um z.B. im Produktgas entsprechende Konzentrationen an Wasserstoff und Methan zu erzielen. In Verbrennungsprozessen sollte für eine hohe Effizienz der Anlage die eingesetzte Biomasse möglichst trocken sein. Um die geforderten Wassergehalte in den biogenen Festbrennstoffen einzustellen werden mechanische Verfahren, die Entwässerung und thermische Verfahren, die Trocknung eingesetzt. Je nach Ausgangswassergehalt der biogenen Festbrennstoffe muss eine Kombination beider Prozesse zur Anwendung kommen. Welche Unterschiede bzgl. Wassergehalt bzw. Trockensubstanz mit den verschiedenen Biomassen vorliegen, zeigt Bild 2 [9]. Für die Trocknung ist es aus Effizienzgründen wesentlich, ein optimales Wärmemanagement im Zusammenspiel mit den thermischen Konversionsverfahren auszuarbeiten und umzusetzen.

Neben der Entwässerung und Trocknung sind weitere Schritte der Brennstoffaufbereitung notwendig bzw. möglich. So wird z.B. in [10] das Bioliquid - Verfahren vorgestellt, welches biogene Rohstoffe einerseits für die Nutzung als konfektionierten Festbrennstoff aufbereitet und andererseits ein hochenergetisches Flüssigsubstrat als Eingangstrom für eine Biogasanlage erzeugt. Je nach eingesetztem Verfahren und Apparat muss der biogene Festbrennstoff z.B. einer Zerkleinerung oder einer Kompaktierung unterzogen werden. Auch eine thermochemische Vorbehandlung wird in einigen Anwendungsfällen als technologisch erforderlich und effizienzsteigernd beschrieben. Wesentlicher Vertreter ist hier die

sogenannte Torrefizierung, was einer schonenden Pyrolyse der Biomasse bei niedrigen Temperaturen entspricht.

| Biogene Rest- und Abfallstoffe | TS-Gehalt (% FM) | oTS-Gehalt (% TS) | Schüttdichte (Mg FM/m³) | Heizwert H_u (MJ/kg FM) |
|--|-----------------------------|------------------------------|---|--|
| Gülle (Rinder- u. Schweine-; gewichtet) | 9,0 % | 72,0 % | 1,00 | -0,8 |
| Stroh (Weizen- u. Gersten-; gewichtet) | | | | |
| Quaderballen | 86,0 % | 93,0 % | 0,13 | 14,5 |
| Waldrestholz | | | | |
| frisch geschlagen | | | | |
| Scheitholz (Laubholz) | 55,0 % | 98,0 % | 0,75 | 8,6 |
| Hackschnitzel (HS) | 50,0 % | 96,0 % | 0,40 | 7,4 |
| 3-6 Monate abgelagert | | | | |
| Scheitholz (Laubholz) | 65,0 % | 98,0 % | 0,60 | 10,6 |
| Hackschnitzel | 65,0 % | 96,0 % | 0,30 | 10,4 |
| 6-12 Monate abgelagert | | | | |
| Hackschnitzel | 70,0 % | 96,0 % | 0,28 | 11,4 |
| Hackschnitzel (zwangsbelüftet) | 75,0 % | 96,0 % | 0,25 | 12,3 |
| thermisch getrocknet: Hackschnitzel | 90,0 % | 96,0 % | 0,20 | 15,3 |
| Industrierestholz (unbelastet) | | | | |
| stückig | 75,0 % | 99,0 % | 0,25 | 12,8 |
| Hackschnitzel | 75,0 % | 99,0 % | 0,30 | 12,8 |
| Pellets | 92,0 % | 99,0 % | 0,55 | 16,2 |
| Altholz, geschreddert | 85,0 % | 90,0 % | 0,25 | 13,4 |
| Bioabfall, strukturschwach | | | | |
| Bioabfall aus der Biotonne | 30,0 % | 80,0 % | 0,75 | 2,6 |
| Küchenabfälle (für Co-Vergärung) | 21,0 % | 92,0 % | 1,00 | 2,1 |
| Restmüll (Hausmüll) | 68,0 % | 60,0 % | 0,35 | 10,0 |
| Klärschlamm, ausgefault | | | | |
| flüssig | 3,0 % | 50,0 % | 1,00 | -2,0 |
| entwässert | 25,0 % | 50,0 % | 1,00 | 0,9 |
| getrocknet | 90,0 % | 50,0 % | 0,70 | 9,7 |

FM = Frischmasse; TS = Trockensubstanz; oTS = organische Trockensubstanz
Quelle: Zusammenstellung in Anlehnung an unterschiedliche Literaturstellen (vgl. Leible et al., 2003)

Bild 2: Biogene Reststoffe und Abfälle – Gehalte an TS und oTS, Schüttdichte und Heizwert (h_u) [9]

4.2 Vergasung

Gaserzeugung

Die Vergasung ist ein Prozess, bei dem der biogene Festbrennstoff unter Zugabe eines Reaktionsgases thermo-chemisch in ein Brenngas umgesetzt wird. Als Reaktionsgas werden in Abhängigkeit von der Zielvorgabe an den Prozess und das Produktgas hinsichtlich der Qualität Luft, Sauerstoff, Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid bzw. Gemische aus den genannten Komponenten eingesetzt. Mit der Zielstellung der Erzeugung von Strom und Wärme wird aus wirtschaftlichen Gründen in den meisten Fällen Luft als Vergasungsmittel eingesetzt, wobei auch Verfahren bzw. Anlagen bekannt sind, bei denen Wasserdampf zum Einsatz kommt. Der Einsatz von Luft bzw. sauerstoffhaltigen Reaktionsgasen hat den Vorteil, dass der Prozess autotherm abläuft, da durch die Oxidationsreaktionen die für die endothermen Vergasungsreaktionen benötigten Temperaturen autark aus dem Prozess bereit gestellt werden.

Der Reaktionsablauf bei der Vergasung von stückigen Brennstoffen lässt sich grob in die Teilschritte Trocknung, Entgasung, Reduktion und Vergasung/Verbrennung unterteilen.

Sind die einzelnen Zonen, in denen die Teilschritte ablaufen, ungenügend voneinander getrennt, d.h. werden mehrere Zielstellungen in einem Reaktionsraum angestrebt, so sind eine Vielzahl von Ziel- und Einflussgrößen überlagert und damit eine Optimierung im Hinblick auf den Umsatz des Feststoffes und die Einstellung der Gasqualität durch die Prozessführung schwierig.

Mit der Beschreibung der verfahrenstechnischen Grundlagen des Gaserzeugungsprozesses und deren Analyse werden die Möglichkeiten einer gezielten Beeinflussung des Prozesses über die Steuerung der Haupteinflussgrößen herausgestellt. Zusammenfassend werden die bisher behandelten und relevanten Haupteinflussgrößen genannt: Sauerstoffangebot, Reaktionsgas, Temperatur und Druck. Weitere und für den optimierten Betrieb wesentliche Einflussgrößen sind: Eigenschaften des Einsatzstoffes, Verweilzeit und Zusatzstoffe.

Systeme zur Gaserzeugung

Die Auswahl des für den jeweiligen Prozess geeigneten Apparates wird im Wesentlichen durch

- den Brennstoff mit seinen chemischen, mechanischen, kalorischen und reaktionskinetischen Eigenschaften und
- die Leistungsgröße

bestimmt.

Spezifische Prozessparameter wie z.B. Druck und Temperatur werden mit konstruktiven Lösungen berücksichtigt. Für die Vergasung von festen Brennstoffen zur dezentralen Energieversorgung werden i. d. R. *Schacht- und Wirbelschichtapparate* und Kombinationen aus diesen eingesetzt.

Schachtreaktoren sind in ihrer Grundkonstruktion verhältnismäßig einfach aufgebaut. Sie gehören zur Gruppe der Wanderbettreaktoren. Auf Grund der Schwerkraft bewegt sich die Schüttung von oben nach unten und das Reaktionsgas wird mit relativ geringen Geschwindigkeiten entweder im Gegenstrom- oder Gleichstrom zu dieser geführt. Die Schüttung wird üblicherweise durch ein Rost gehalten.

Schachtapparate besitzen zunächst den Vorteil einer einfachen Konstruktion. Wesentlicher Nachteil sind die inhomogenen Reaktionsbedingungen, welche auf Grund der ungenügenden Verteilung der Reaktionsgase im Reaktorvolumen und daraus resultierend schlechte Wärme- und Stoffübergangsbedingungen vorherrschen. Dieses Reaktorverhalten begrenzt die Möglichkeit der Skalierbarkeit nach oben. Um noch gute Betriebsergebnisse erreichen zu können, sollte die Vergaserleistung eines Schachtvergasers auf Basis von Biomasse nicht über 5 MW gesteigert werden.

Ein weiterer Nachteil ergibt sich aus der begrenzten Einflussnahme auf die unterschiedlichen Prozessstufen. Zwar liegt hier in konstruktiven Speziallösungen Optimierungspotential, woraus aber durch Einbauten usw. andere Probleme in der Prozessführung resultieren. Eine Möglichkeit der Prozessgestaltung liegt in der räumlichen Trennung der verschiedenen Teilschritte, was aber einen erhöhten apparate- und sicherheitstechnischen Aufwand erfordert.

In einem *Wirbelschichtreaktor* wird der Brennstoff in ein körniges inertes Material eingemischt, welches in dem Prozess als Wärmeträger fungiert. Das Feststoffgemisch wird mit dem Reaktionsgas, welches von unten über einen Düsenboden in den Reaktor eingebracht wird, fluidisiert und in einen Schwebезustand versetzt. Um diese Prozessbedingungen zu gewährleisten werden bestimmte Anforderungen an die Abmessung des Brennstoffes gestellt. Je nach der eingestellten Gasgeschwindigkeit im Reaktor bildet sich eine stationäre oder zirkulierende Wirbelschicht aus.

Die Wirbelschicht zeichnet sich auf Grund der guten Durchmischung und dem intensiven Kontakt zwischen Brennstoff, Wärmeträger und Reaktionsgas/Zwischenprodukte durch hervorragende Wärme- und Stoffübergangsbedingungen aus.

Der Wirbelschichttechnik sind in der Leistungsfähigkeit nach oben hin erst > 100 MW Vergaserleistung Grenzen gesetzt. Der große Vorteil dieses Verfahrens liegt in der relativ einfachen Skalierbarkeit des Reaktors, da die Haupteinflussgröße auf die Geometrie des Reaktors die Gasgeschwindigkeit ist. Eine Veränderung des Querschnitts hat bei korrekter Umsetzung keine negativen Auswirkungen auf das Reaktorverhalten.

Der limitierende Betriebsparameter in einer Wirbelschicht ist die Reaktionstemperatur, welche unterhalb der Ascheschmelztemperatur liegen muss.

Ein für die Vergasung vor dem Hintergrund der Schadstoffbildung im Prozess sehr wichtiger Vorteil der Wirbelschicht ist die ausgezeichnete Möglichkeit der Zugabe von Zuschlagstoffen bzw. im direkten Einsatz von Bettmaterial, welches z.B. katalytisch auf hohe Teerumsatzraten im Vergasungsprozess selber, wirkt.

Gasreinigung und Gasaufbereitung

Störkomponenten im Rohgas, welche vor einer Weiternutzung entfernt werden müssen, sind hauptsächlich *Teer, Stickstoff-, Chlor- und Schwefelverbindungen, Alkalien und Partikel*. Ob und in welcher Konzentration diese Komponenten im Gas vorhanden sind, ist abhängig von der Zusammensetzung der im Vergaser eingesetzten biogenen Festbrennstoffe.

Entsprechend der „Endnutzung“ des Gases werden unterschiedliche Anforderungen an die Qualität des Gases gestellt.

Die Konzentrationen der Störstoffe im Rohgas und die Anforderungen an die Gasqualität zur Weiterverarbeitung in einem Verbrennungsmotor sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Anforderungen an die Gasqualität entsprechend der Nutzung [11]

| <i>Störstoffe</i> | <i>Rohgas [mg/Nm³]</i> | <i>Grenzwerte Gasmotor [mg/Nm³]</i> |
|--|-----------------------------------|--|
| Teer | < 5 · 10 ⁴ | < 100 |
| Na + K | < 1,7 | k.A. |
| NH ₃ + HCN | < 1.600 | < 55 |
| H ₂ S + COS + CS ₂ | < 170 | < 1.150 |
| Halogene | < 480 | k.A. |
| Staub | < 105 | < 50 |

Im Folgenden werden die bekannten verfahrenstechnischen Möglichkeiten zur Einstellung der geforderten Gasqualität hinsichtlich

- Teer,
- Alkalien, Halogenide und Schwefelwasserstoff und
- Partikel

erläutert.

Teerabbau durch primäre Maßnahmen:

Eine Möglichkeit teearmes, qualitativ hochwertiges Brenngas herzustellen ist der Einsatz mehrstufiger Vergaser, deren wesentlicher Vorteil die getrennte Prozessführung darstellt. Die mehrstufige Ausführung des Verfahrensprozesses ist geeignet, zu kontrollierbaren Zuständen im Gaserzeuger und zu teearmen Brenngas zu gelangen. Auch ist in manchen der mehrstufigen Anlagen der Einsatz problematischer Brennstoffe besser möglich als beispielsweise in einstufigen Festbettvergasern.

Eine weitere Möglichkeit der Teerbildung im Vergasungsprozess entgegen zu wirken ist der Einsatz von katalytisch aktiven Materialien. Diese Verfahrensvariante wurde bisher ausschließlich in der Wirbelschicht untersucht, da in diesem Fall durch den Einsatz eines

Bettmaterials eine Dosierung der katalytisch wirkenden Substanzen einfach realisiert werden kann.

Teerabbau durch sekundäre Maßnahmen:

Als sekundäre Maßnahmen für die Brenngasaufbereitung aus Biomassevergasungsanlagen stehen physikalische und chemische Methoden zur Verfügung. In [12] und [13] werden u.a. die verschiedenen zum Einsatz kommenden Reinigungstechniken detailliert dargestellt.

In Tabelle 2 sind in einer Übersicht die Prozesse, welche zur Teerabscheidung bzw. Umsetzung als Sekundärmaßnahme zur Verfügung stehen, zusammengefasst.

Tabelle 2: Technologien der Teerreduzierung und –entfernung [11]

| <i>Teerentfernung</i> | | |
|-----------------------|---|---|
| | <i>Physikalische Methoden</i> | <i>Chemische Methoden</i> |
| Kaltgasreinigung | Absorption (Wäsche, Quenche) Adsorption Nasselektrofilter | Chemisorption (Chemische Wäsche - Monoethanolamin - MEA, Pottasche - K ₂ CO ₃ -Lsg.) Katalytische Prozesse |
| Heißgasreinigung | Heißgasfiltration | Crackung Hydrierung Reformierung Partielle Oxidation |

Alkalien, Halogenide und Schwefelverbindungen:

Der Anteil an Alkalien und Halogeniden in Vergasungsgasen wird im Wesentlichen durch ihren Gehalt im Brennstoff und durch die Bindungsform dieser im Brennstoff bestimmt. Die anorganischen Spurenstoffe wirken sich insbesondere auf das Ascheschmelzverhalten aus, begünstigen die Hochtemperaturkorrosion und limitieren die Lebensdauer von in nachgeschalteten Reinigungsstufen eingesetzten Katalysatoren durch Vergiftung bzw. verringern durch eine Belagsbildung die aktive Oberfläche.

Für die Abscheidung von Alkalien und Halogeniden werden trockene und nasse Abscheideverfahren eingesetzt. Diese werden in Kaltgas- und Heißgasreinigungsverfahren unterteilt.

Für eine sekundäre Maßnahme zur Verringerung der Schwefelkonzentration bietet sich der Einsatz von Metalloxiden in einer Heißgasreinigung an. Es können z.B. Zinkoxid oder Eisenoxid angewandt werden. Als Kaltgasreinigungsverfahren zur H₂S-Entfernung existieren die Gaswäsche und die Adsorption an Aktivkoks bzw. –kohle, Raseneisenerz und Zeolithe (Molekularsiebe).

In Tabelle 3 sind die unterschiedlichen Möglichkeiten der Entfernung der Spurenstoffe und die Prozessbedingungen für eine effektive Abscheideleistung zusammengefasst.

Tabelle 3: Gasreinigungsverfahren zur Abscheidung von Alkalien, Halogenen und Schwefelverbindungen

| <i>Komponente</i> | <i>Kaltgasreinigung</i> | <i>Bed.</i> | <i>Heißgasreinigung</i> | <i>Bed.</i> |
|-------------------|-------------------------|-------------|--|--------------------------|
| Alkalien | Kondensation | < 600 °C | Adsorption • Bauxit, Dolomit | > 800 °C |
| Halogene | Nassabscheider | | Adsorption • kalziumbasiert • natriumbasiert | 400 - 700 °C < 600 °C |
| Schwefel- | • Chemische Wäsche | | Adsorption | |

| | | | | |
|--------------|--|--|--|---------------------------------------|
| verbindungen | <ul style="list-style-type: none"> • Physikalische Wäsche • Adsorption an Aktivkoks und Zeolithe | | <ul style="list-style-type: none"> • Metalloxide • Kalziumbasiert (Ca(OH)₂) | <p>> 600 °C</p> <p>> 600 °C</p> |
|--------------|--|--|--|---------------------------------------|

Partikel:

Für die Abscheidung der feinen Partikelfraktion existieren Elektrofilter und filternde Abscheider. Elektrofilter können bis zu Temperaturen von 400 °C eingesetzt werden.

Die Anwendung der filternden Abscheider wird favorisiert. So kommen z.B. Bettfilter zum Einsatz, welche den großen Vorteil aufweisen neben dem Staub auch Teere und mit der gezielten Auswahl des Bettmaterials Schwefel-, Halogen- und Alkaliverbindungen aus dem Gas zu entfernen. Nachteilig wirken sich der Anstieg des Druckverlustes des Filters mit fortschreitender Betriebszeit und eine verfahrenstechnisch schwierig durchführbare Regeneration aus.

Mit dem Einsatz von Gewebe- oder Faserfiltern werden die höchsten Abscheidegrade von 99,99 % erreicht. Die Abreinigung der Filterelemente erfolgt während des Betriebes. Der Nachteil dieser Abscheider ist bei Einsatz üblicher Filtermaterialien (Textilgewebe) die begrenzte Betriebstemperatur von ca. 250 °C. Metallgewebefilter können bis zu Betriebstemperaturen von 450 °C eingesetzt werden. Noch höhere Temperaturen erfordern die Verwendung von keramischen Materialien, welche gegenüber den Fasern sehr viel teurer sind. Die Staubabscheidung wird dann über keramische Filterkerzen oder Sintermetallkerzen realisiert.

4.3 Verbrennung

Die Verbrennung ist ein Prozess, bei dem der biogene Festbrennstoff unter Zugabe eines Oxidationsmittels direkt in End- bzw. Nutzenergie umgesetzt wird. Als Oxidationsmittel werden üblicherweise Luft, aber auch reiner Sauerstoff eingesetzt. Die Verbrennung mit reinem Sauerstoff wird vor dem Hintergrund der Erzeugung eines nahezu stickstofffreien Abgases für eine optimale Abtrennung von Kohlendioxid aus dem Abgas praktiziert.

Der Reaktionsablauf bei der Verbrennung von festen Brennstoffen lässt sich grob in die Teilschritte Trocknung und Pyrolyse der Biomasse und Verbrennung der aus der Biomasse erzeugten Pyrolysegase unterteilen. Bei der Verbrennung wird thermische Energie erzeugt, welche in Form von Wärme in den Verbrennungsgasen gebunden ist. Als fester Rückstand verbleiben Schlacke, Grob- und Feinasche.

Die Haupteinflussgrößen für eine Prozessoptimierung der Verbrennung sind identisch denen bei dem Prozess der Vergasung (Abschnitt 4.2).

Zur Erzeugung von Wärme und/oder Strom mittels der Verbrennung von fester Biomasse stehen eine Reihe etablierter Technologien und entsprechende Apparate zur Verfügung.

Systeme zur Verbrennung

Die Festlegung, welcher Apparate bzw. welches Feuerungssystem eingesetzt wird, ist vordergründig von den Brennstoffeigenschaften und der Leistungsgröße abhängig. In Bild 3 sind Systeme zur Verbrennung unterschiedlicher Biomassen als Funktion der Form der Biomasse und der Leistungsgröße dargestellt.

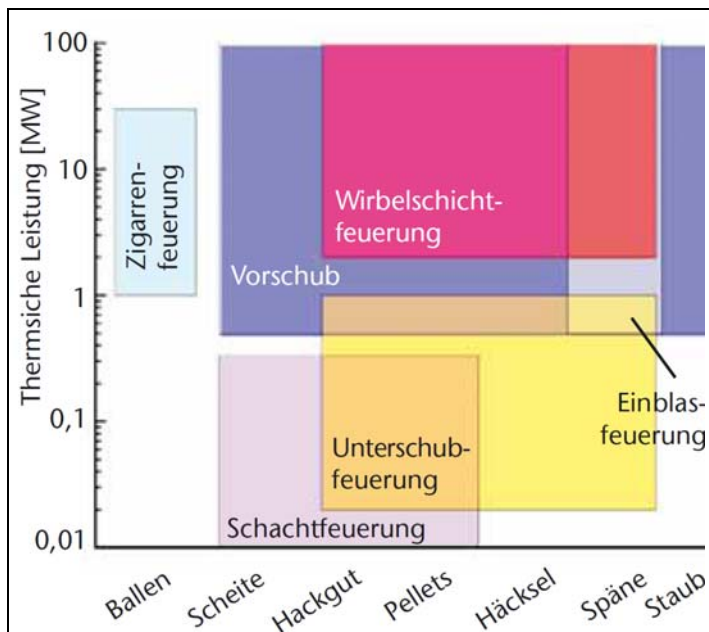


Bild 3: Feuerungssysteme in Abhängigkeit der Anlagengröße und der Form der Biomasse [14]

Für die dezentrale Energieversorgung über das thermische Konversionsverfahren Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen werden i. d. R. *Schacht- und Unterschubfeuerungen, Rostfeuerungen und Wirbelschichtfeuerungen* eingesetzt.

Schacht- und Unterschubfeuerungen werden in Leistungsbereichen bis ca. 6 MW_{th} verwendet und dienen vornehmlich der Wärmebereitstellung. Die Begrenzung der Leistungsgröße nach oben ist in der Brennstoffzufuhr über Förderschnecken begründet. Bekannte Einsatzgebiete dieser Systeme sind z.B. die Holzverarbeitende Industrie, wobei hier die Reststoffe aus der Produktion zur Heiz- und Prozesswärmeerzeugung genutzt werden. Der wesentliche Vorteil dieser Technik ist die relativ einfache Konstruktion und die kompakte Bauweise. Bei Einsatz von Schacht- und Unterschubfeuerungen ist die Brennstoffbeschaffenheit eine der wichtigsten Einflussgrößen. Es sollten möglichst solche Biomassen zum Einsatz kommen, die von der Konsistenz her sehr gleichmäßig sind und einen geringen Aschegehalt aufweisen.

Bei den *Feuerungssystemen mit Rosten* wurden unterschiedliche Typen entwickelt und entsprechend den Vorgaben durch Brennstoff und Leistung eingesetzt: Vorschub-/Rückschubrost, Vibrationsrost, Wanderrost und Walzenrost. Rostfeuerungen werden im Leistungsbereich $> 1 \text{ MW}_{\text{th}}$ angewendet, da diese Technik im Gegensatz zu Unterschubfeuerungen sehr aufwendig ist und ein Einsatz unterhalb dieser Leistungsgröße unwirtschaftlich wäre. Die obere Grenze der Feuerungswärmeleistung liegt bei $100 \text{ MW}_{\text{th}}$. Vorteil der Rostsysteme ist die Funktionalität für eine Vielzahl von Biomassen mit unterschiedlichen Eigenschaften. So kann z.B. der Wassergehalt der Inputstoffe zwischen 5 % und 60 % schwanken und es sind Brennstoffe mit Aschegehalten bis zu 50 % einsetzbar. Diese Variabilität wird auf Grund der zahlreichen Möglichkeiten der Prozesssteuerung über die Regelung der Haupteinflussgrößen möglich. Als Beispiel sei hier die Menge an zugeführtem Oxidationsmittel, die Stufung der Oxidationsmittelzugabe und die Anpassung der Verweilzeit mittels der Rostgeschwindigkeit zu nennen. Dieser Vorteil kommt nur zum Tragen, wenn die Brennstoffqualität für den eingestellten Betriebspunkt hinreichend konstant bleibt. Gibt es Änderungen in der Zusammensetzung des Inputmaterials, wirken sich diese sofort auf die Qualität des Verbrennungsprozesses bzgl. Feuerraumtemperatur, Ausbrandgrad und Emissionen aus. D.h. die Rostfeuerung ist zwar für viele Brennstoffspektren einsetzbar aber für schnelle Lastwechsel nicht geeignet.

Wirbelschichtverbrennungssysteme werden vornehmlich aus wirtschaftlichen Gründen erst ab einer Leistungsgröße von $10 \text{ MW}_{\text{th}}$ bis $15 \text{ MW}_{\text{th}}$ eingesetzt. Die Brennstoffanforderungen für den Einsatz und die Funktionsweise der Wirbelschichttechnik wurden bereits in Abschnitt 4.2 in der Anwendung für die Vergasung von Biomasse erläutert.

Wärmenutzung

Die durch die exothermen Verbrennungsreaktionen freiwerdende Wärme wird in Verbrennungssystemen bevorzugt zur Dampferzeugung in einem Naturumlaufkessel genutzt. Als Arbeitsmedien können Wasser und organische Fluide zum Einsatz kommen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Kühlung des Rauchgases mittels Luft, um so z.B. einen Stirlingmotor zu betreiben (siehe Abschnitt 4.4).

Abgasreinigung

Welche Störkomponenten und in welcher Konzentration im Rauchgas vorliegen, ist zum einen abhängig von der eingesetzten Biomasse und zum anderen von den Prozessbedingungen. Da bei den thermischen Konversionsverfahren Vergasung und Verbrennung von identischen biogenen Festbrennstoffen ausgegangen wird, kann die Einteilung der Grundschatstoffe *Stickstoff, Chlor, Schwefel, Alkalien, Halogenide und Partikel* im Verbrennungsgas denen im Vergasungsgas gleich gesetzt werden, wobei es auf Grund unterschiedlicher Reaktionsbedingungen (reduzierend – oxidierend) zu verschiedenen Bindungsformen der Komponenten führen wird. Für die Abgasbehandlung werden dieselben Basistechnologien mit den entsprechenden Hilfsstoffen und Wirkmechanismen, wie bei der Behandlung von Vergasungsgasen vorgestellt, eingesetzt. Einzig und allein die Stufe der Teerentfernung bzw. –umsetzung kann entfallen.

4.4 Strom- und Wärmeerzeugung

Die Umwandlung der chemisch gebundenen Energie in den entsprechend der weiteren Verwendung aufbereiteten Brenngasen aus der *Biomassevergasung* in mechanische/elektrische und thermische Energie wird im dezentralen Leistungsbereich z. Zt. am häufigsten unter Einsatz eines Blockheizkraftwerkes (BHKW's) mit Gas-Otto- oder Zündstrahldieselmotor realisiert.

Aber auch innovative Prozesse, wie z.B. der Einsatz der Brennstoffzellentechnik zur Erzeugung von Strom und Wärme werden in Konzepten zur dezentralen Energieversorgung auf Basis der Vergasung von biogenen Festbrennstoffen untersucht.

Der bei der Abkühlung des Rauchgases aus den *Verbrennungsprozessen* erzeugte Dampf wird in einer Dampfturbine entspannt und der entspannte Dampf in einem Wärmeübertrager kondensiert, wobei die Kondensationswärme Endnutzern zur Verfügung gestellt wird. Eine weitere Möglichkeit der Dampfnutzung zur Strom- und Wärmeerzeugung besteht mit dem Einsatz von Spilling-Dampfmaschinen.

Neben dem klassischen Dampfkraftprozess wird hinter Verbrennungsanlagen auch der ORC-Prozess zur Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt. Das bietet sich bei Leistungsgrößen

< 1 MW_{th} an, da in diesem Bereich der Einsatz einer Dampfturbine wirtschaftlich nicht mehr darstellbar ist. Hier wird statt Wasser Thermalöl erhitzt, welches dann wiederum ein organisches Arbeitsmedium, welches eine Verdampfungstemperatur < 100 °C aufweist, verdampft. Dieser organische Dampf wird wie im Wasserdampfprozess über eine Dampfturbine und ein Kühl- und Kondensationssystem geführt. Der Vorteil des ORC liegt im Bedarf sehr niedriger Temperaturdifferenzen zur Verdampfung des Fluides.

Eine innovative Lösung ist mit der Nutzung von Stirlingmotoren gegeben, welche als Arbeitsmedium z.B. Luft benutzen.

Alle vorgestellten Systeme arbeiten nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Welches Konzept zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt wird hängt neben der Leistungsgröße des KWK-Blockes auch von der Qualität des Brenngases im Falle der Vergasung und von dem zur Verfügung stehenden Temperaturniveau des Arbeitsmediums bei einer vorgeschalteten Verbrennungsanlage ab

5 Bewertung der Verfahren

Eine umfassende energetische und wirtschaftliche Bewertung der Verfahren Vergasung und Verbrennung von Biomasse für die dezentralen Energieversorgung und ein sich daraus

abgeleiteter Vergleich der beiden Konversionsverfahren kann nur unter Vorgabe praxisrelevanter Rahmenbedingungen erfolgen. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse einer Bewertung, welche auf definierten Kriterien in zwei Modellen der Energieversorgung mit Biomasse basieren, vorgestellt.

Unter Vorgabe einer zu erzeugenden elektrischen Leistung von 1,0 MW, einer Betriebszeit von 7.000 h/a und einer konstanten Holzqualität bei einem Heizwert von 14,25 MJ/kg werden für die Bilanzierung eines Biomasseheizkraftwerkes (Tabelle 4) und eines Biomassevergasersystems mit BHKW (Tabelle 5) beispielhaft folgende Ergebnisse angegeben.

Tabelle 4: Ergebnisse für den In- und Output des Holzheizkraftwerks

| Input (Brennstoff) | | | Output (Nutzenergie) | | |
|---------------------|------|--------|--------------------------|-------|------------|
| Brennstoffdurchsatz | kg/h | 2.686 | Elektrische Leistung | MW | 1,0 |
| Brennstoffleistung | MW | 8,33 | Elektrische Jahresarbeit | MWh/a | 7.000 |
| Jahresbedarf | t/a | 18.799 | Thermische Leistung | MW | 4,2 |
| | | | Thermische Jahresarbeit | MWh/a | 14.583 |

Tabelle 5: Ergebnisse für den In- und Output des Holz-Vergasersystems mit BHKW

| Input (Brennstoff) | | | Output (Nutzenergie) | | |
|---------------------|------|--------|--------------------------|-------|------------|
| Brennstoffdurchsatz | kg/h | 1.842 | Elektrische Leistung | MW | 1,0 |
| Brennstoffleistung | MW | 5,7 | Elektrische Jahresarbeit | MWh/a | 7.000 |
| Jahresbedarf | t/a | 12.891 | Thermische Leistung | MW | 2,57 |
| | | | Thermische Jahresarbeit | MWh/a | 9.000 |

Für das Holzheizkraftwerk wurde ein elektrischer Wirkungsgrad von 12 % und ein thermischer Wirkungsgrad von 50 %, bezogen auf die Feuerungswärmeleistung, angenommen. Im Fall der Vergasung wurde für η_{el} ein Wert von 17,5 % und für η_{th} 45 %, bezogen auf die chemische Leistung der Biomasse, eingesetzt. Wenn für den Kesselwirkungsgrad im Holzheizkraftwerk ein Wert von 85 % angenommen wird und von einem Kaltgaswirkungsgrad des Vergasers von 70 % ausgegangen wird, ordnen sich die in der Modellbilanzierung eingesetzten Wirkungsgrade in die in Bild 4 angegebenen Bereiche für die Dampfturbine kleiner Leistung und in die Bereiche, welche für die Vergasung im Festbett angegeben werden, ein.

| | Entwicklungsstand | Leistungsbereich MW _{el} | Spezifische Investitionen TEUR/kW _{el} | Wirkungsgrad | |
|-------------------------------|-------------------|--------------------------------------|--|--------------|-------------|
| | | | | Wärme | Strom |
| Dampfturbine kleiner Leistung | etabliert | 0,5 - 5,0 | 0,36 - 1,6 | 0,62 - 0,71 | 0,10 - 0,20 |
| Dampfturbine großer Leistung | etabliert | 1 - 50 | 2,6 - 8,7 | 0,25 - 0,67 | 0,18 - 0,30 |
| Dampfmotor | marktreif | 0,1 - 1,6 | 0,4 - 4,8 | 0,70 - 0,80 | 0,08 - 0,15 |
| ORC-Prozess | marktreif | 0,1 - 5,0 | 1,6 - 4,8 | 0,75 - 0,78 | 0,06 - 0,20 |
| Vergasung Festbett | Demonstration | 0,05 - 7,0 | 2,4 - 4,9 | 0,40 - 0,62 | 0,18 - 0,28 |
| Vergasung Wirbelschicht | Demonstration | 5 - 100 | 1,4 - 3,5 | 0,31 - 0,50 | 0,25 - 0,33 |
| Stirlingmotor | Demonstration | 0,01 - 0,2 | 1,7 - 4,0 | 0,49 - 0,70 | 0,07 - 0,30 |

Bild 4: Übersicht von KWK-Systemen für feste Biomassen [15]

Für die Wirkungsgrade bezogen auf den KWK-Prozess ergeben sich für die Modellkonzepte folgende Werte:

| Anlage | Wirkungsgrad | |
|------------------------------------|--------------|-------|
| | Wärme | Strom |
| Holzheizkraftwerk mit Dampfturbine | 0,60 | 0,14 |
| Holz-Vergaser mit BHKW | 0,64 | 0,25 |

Für die in den Beispielen angenommenen Randbedingungen kann hinsichtlich der energetischen Bewertung folgende Aussage getroffen werden:

Für die dezentrale Versorgung eines Verbrauchers mit einer elektrischen Leistung von 1 MW werden in dem vorliegenden Fall bei der Realisierung mit einem Biomasseheizkraftwerk und einer Dampfturbine 46 % mehr Biomasseinput benötigt als bei der Umsetzung mit einer Vergasungsanlage und einem BHKW. Da der thermische Wirkungsgrad für beide Fällen nur um 4 %-Punkte abweicht, können mit der Vergasungsanlage bei geringerer Feuerungswärmeleistung entsprechend weniger Wärme erzeugt werden, was einen erheblichen Einfluss auf die wirtschaftliche Darstellung der Anlage nimmt. Für eine ganzheitliche energetische und darauf aufbauend wirtschaftliche Bewertung und ein sich daraus abgeleiteter Vergleich der Konversionsverfahren sind diese Ergebnisse somit unzureichend. Wie bereits in Abschnitt 4.1 erwähnt, hat auch die Konditionierung der Biomassen einen wesentlichen Einfluss auf die Energiebilanz der gesamten Verfahrenskette. Schon unter dem technologischen Gesichtspunkt, dass in einem Biomasseheizkraftwerk auf einem Rost auch Biomassen mit schlechterer Qualität eingesetzt werden können, d.h. z.B. größerer Wasser- und Aschegehalt und daraus resultierend ein niedrigerer Heizwert, ergibt sich die Notwendigkeit einer umfangreichen Untersuchung der energetischen und wirtschaftlichen Bedingungen unter dem Aspekt der Vergleichbarkeit der Technologien Vergasung und Verbrennung.

6 Technologische Stand der Verfahren und Marktsituation

6.1 Vergasung

Obwohl die Entwicklung der Vergasungstechnologie für Biomasse bis ins Jahr 1788 zurück reicht, befindet sich die Vergasung von biogenen Festbrennstoffen, wie auch in Bild 4 dargestellt, heute noch im Demonstrationsstadium. Das begründet sich vor allem in den vielfach noch ausstehenden Betriebserfahrungen im Langzeitbetrieb.

In [16] wird der im Jahr 2012 erreichte technologische Stand der Vergasung von Biomasse, ins Besondere im Leistungsbereich bis 250 kW_{el}, vorgestellt. Aber auch Anlagen mit einer Leistung bis 1 MW_{el} und größer wurden in dieser Bestandsaufnahme berücksichtigt. Die Basis für die Untersuchungen waren Direktkontakte mit Verfahrensträgern, die als Entwickler, Hersteller und Anbieter in den letzten Jahren das Vorankommen dieser Technologie in Deutschland stark beeinflusst haben.

In [16] wird im Ergebnis abgeschätzt, dass 30 von 50 Verfahrensträgern ihre Anlagen vor dem Hintergrund eines wirtschaftlichen Betriebes einsetzen und nicht mehr als Versuchsanlage eingestuft werden können, wobei der Erkenntnisstand mit jeder Erweiterung der Betriebserfahrung wächst und bei der Optimierung Berücksichtigung finden. Dennoch, eine belastbare unabhängige Untersuchung bzw. Studie zur Leistungsfähigkeit dieser Verfahren auf Basis von durchgeführten Betriebsmessungen und darauf aufbauenden Masse-, Stoff- und Energiebilanzierungen stehen noch aus.

6.2 Verbrennung

In Deutschland existiert eine Vielzahl von Biomasseheizkraftwerken. In Bild 5 sind die Anzahl der Heizkraftwerke und die installierte elektrische Leistung der Anlagen nach Bundesländern statistisch ausgewertet.

| Bundesland | Anlagenanzahl | | installierte elektrische Leistung | | durchschnittlich install. elektrische Leistung | |
|------------------------|----------------|----------------|-----------------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|
| | in Betrieb [-] | Zubau 2011 [-] | in Betrieb* [MW _{el}] | Zubau 2011 [MW _{el}] | in Betrieb [MW _{el}] | Zubau 2011 [MW _{el}] |
| Baden-Württemberg | 39 | 3 | 144 | 5,5 | 3,7 | 1,8 |
| Bayern | 62 | 5 | 196 | 12,6 | 3,2 | 2,5 |
| Berlin | 1 | - | 20 | - | 20,0 | - |
| Brandenburg | 21 | - | 163 | - | 7,8 | - |
| Bremen | 0 | - | 0 | - | - | - |
| Hamburg | 2 | - | 22 | - | 10,9 | - |
| Hessen | 15 | 2 | 71 | 6,1 | 4,7 | 3 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 8 | - | 52 | - | 6,5 | - |
| Niedersachsen | 15 | 1 | 121 | 0,6 | 8,1 | 0,6 |
| Nordrhein-Westfalen | 29 | 1 | 190 | 3,5 | 6,5 | 3,5 |
| Rheinland-Pfalz | 18 | - | 69 | - | 3,9 | - |
| Saarland | 2 | - | 4 | - | 2,1 | - |
| Sachsen | 15 | 1 | 89 | 2,0 | 5,9 | 2 |
| Sachsen-Anhalt | 11 | - | 39 | - | 3,6 | - |
| Schleswig-Holstein | 5 | - | 11 | - | 2,3 | - |
| Thüringen | 13 | - | 69 | - | 5,3 | - |
| Gesamt | 256 | 13 | 1 260 | 30,3 | 4,9 | 2,3 |

*gerundete Werte

Bild 5: Regionale Verteilung der Biomasseheizkraftwerke, Stand Ende 2011 [17]

In [17] wird die Struktur der Biomasseheizkraftwerke in den verschiedenen Sektoren dargestellt:

- 44 % im holzbe- und verarbeitenden Gewerbe,
- ca. 26 % bei Energieversorgungsunternehmen,
- ca. 15 % finanziert und realisiert durch Investoren- und Betreiberverbände und
- ca. 15 % in Industriezweigen außerhalb der Holzindustrie.

In Deutschland gibt es laut Online-Lieferanten-Verzeichnis ca. 16 Hersteller von schlüsselfertigen Biomasseheizkraftwerken im Leistungsbereich > 1 MW Feuerungswärmeleistung. Planer, Dienstleister und Händler von Biomasseheizkraftwerken wurden bei dieser Recherche nicht berücksichtigt.

7 Zusammenfassung

Mit der bzw. den in dem Beitrag

- zu Grunde gelegten Motivation für die dezentrale Energieversorgung auf Basis von biogenen Festbrennstoffen auf Basis der Zielstellung der Bundesregierung, dargestellt im Energiekonzept,
- dargestellten aktuellen Situation im Bereich der Energiebereitstellung aus Erneuerbaren Energien und
- abgeschätzten Potentialen an technologisch erschließbaren festen Biomassen

wurde zunächst heraus gestellt, dass eine Energieversorgung gestützt auf Frisch- und Recyclingholz ressourcenbezogen nicht praktikabel ist. Eine Mobilisierung anderen Biomassen, welche für den Einsatz in thermischen Verfahren zur Erzeugung von Strom und

Wärme geeignet sind, ist unabdingbar. Bei der Umsetzung muss eine Vielzahl von Fragestellungen behandelt werden.

1. Welche Biomassen stehen in ausreichender Menge zur Verfügung?
2. Welche chemischen, mechanischen, kalorischen und reaktionskinetische Eigenschaften haben diese Biomassen und wie können diese modifiziert werden?
3. Welche thermischen Konversionsverfahren stehen zur Verfügung?
4. Sind die aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren und Technologien für die Biomassen einsetzbar bzw. unter welchen Nebenerscheinungen sind sie anzuwenden oder müssen sie an die Biomassequalitäten und die Verbrennungsbedingungen angepasst werden?
5. Sind die verfügbaren Modelle zur dezentralen Energieerzeugung energetisch und wirtschaftlich vergleichbar und lassen sich die Konzepte unter realistischen Rahmenbedingungen wirtschaftlich darstellen?

In zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen werden die verschiedensten festen Biomassen auf ihre thermische Verwertbarkeit hin untersucht. Diese Arbeiten umfassen chemische und mechanische Analysen, Untersuchungen zum Zündverhalten und Versuche in Anlagen wie der TGA, dem Fieldrohr oder dem Batch-Reaktor, um reaktionskinetische Kennzahlen für die Behandlung der Biomassen in den Verfahren Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung zu ermitteln. An der TU Dresden wurde auf Basis der Ergebnisse dieser Untersuchungen eine Biomassedatenbank erstellt, welche die wichtigsten Eigenschaften vom Apfelkern, über Kaffeeschalen und -satz bis hin zum Zypressenholz beinhaltet.

Mit der Darstellung der verfügbaren Verfahren zur dezentralen Energieversorgung aus biogenen Festbrennstoffen, eingeschlossen die notwendige Konditionierung der Biomasse für den Einsatz zur Strom- und Wärmeerzeugung, wurden zunächst die Grundlagen der Vergasung und Verbrennung dargestellt und eine Eingrenzung der anzuwendenden Konzepte vor dem Hintergrund des dezentralen Anwendungsbereichs vorgenommen.

Eine umfassende energetische und wirtschaftliche Bewertung und ein darauf aufbauender Vergleich hinsichtlich Effizienz von Vergasungs- und Verbrennungsverfahren kann nicht Inhalt dieses Beitrages sein. Um solch eine Bewertung vorzunehmen sind umfassende Untersuchungen notwendig, welche aber konsequent noch nie durchgeführt wurden. Im Beitrag werden lediglich die Ergebnisse einer Masse- und Energiebilanzierung vorgestellt, welche auf Rahmenbedingungen aufbauen, die bestimmten Modellvorstellungen entsprechen. Für eine konsequente Umsetzung der Bewertung müssen realistische Verfahren bilanziert und analysiert werden.

In einer Recherche über den technologischen Stand der Vergasung und Verbrennung zur Strom- und Wärmeerzeugung konnte festgestellt werden, dass ein Großteil der industriell umgesetzten Konzepte auf Basis der Biomasse Holz realisiert wurden und werden. D.h. vor dem Hintergrund der festgestellten Notwendigkeit der Mobilisierung weiterer Biomassen und der technologischen Umsetzung der thermischen Nutzung dieser muss noch ein erhebliches Maß an Forschungsarbeit geleistet werden. Nur so kann es gelingen, die Ziele der Bundesregierung hinsichtlich der Energieerzeugung aus Erneuerbaren Energien zu erreichen.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und Internationale Entwicklung. Stand Juli 2012.
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Stand September 2010.
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erneuerbare Energien 2010. Stand Juli 2011.

- [4] Marutzky, R.: Stoffliche versus energetische Nutzung von Holz. 17. Internationale Fachtagung Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Freiberg, September 2011
- [5] Bayrisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen: Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. September 2000
- [6] Basisdaten Bioenergie Deutschland August 2012. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.. gefördert durch Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.
- [7] M. Pohl, D. Bernhardt, S. Ncube, M. Beckmann, W. Spiegel, W. Müller: Diagnostic Methods into the Corrosion Potential of Alternative Fuels i.e. Biomass and Refuse Derived Fuels in Proceedings of the Conference on Impacts of Fuel Quality on Power Production and Environment. Saariselkä 2010.
- [8] S. Unz, T. Wen, M. Beckmann: Characterization of Biomass Used in Thermal Processes with Regard to the Kinetic Properties in Proceedings of the 35th International Technical Conference on Clean Coal & Fuel Systems. Clearwater 2010.
- [9] L. Leible; S. Kälber: Potenzial der Energiebereitstellung aus biogenen Reststoffen und Abfällen für Deutschland – ein Überblick. In: NAROSSA 10. Internationaler Kongress für nachwachsende Rohstoffe und Pflanzenbiotechnologie. 7.-8. Juni 2004, Magdeburg
- [10] T. Lehmann: Zusätzliche Gasgewinnung aus Gärrückständen in Höhe von 25 % des bilanzierten Biogasertrages auf Grund des Energiegehaltes. DGMK-Fachbereichstagung. Konversion von Biomassen. Rotenburg a. d. Fulda. März 2012.
- [11] Böhning, D.; Beckmann, M.: Dezentrale Biomassevergasung – Teerabbau durch primäre und sekundäre Maßnahmen. Erneuerbare Energien. Band 2. TK Verlag Thome-Kozmiensky. 2009.
- [12] Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Untersuchung im Auftrag von BGW und DVGW. Band 3: Biomassevergasung, Technologien und Kosten der Gasaufbereitung und Potenziale der Biogaseinspeisung in Deutschland. August 2005.
- [13] Arbeitsbericht der Projektgemeinschaft Biomassevergasung; Hersteller und Marktbetrachtung der thermochemischen Umwandlung von Biomasse; gefördert durch die Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe
- [14] H. Spliethoff: Thermische Nutzung von Biomasse – Ausgangsstoffe und Konversionsverfahren. FVS-LZE Themen 2005
- [15] Neue Chancen mit der Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie. Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e. V.
- [16] D. Bräkow; E. Oettel; I. Rieckert; T. Zschunke: Zum Stand der thermochemischen Vergasung von Biomasse in Deutschland Anfang 2012. DGMK Tagungsbericht 2012-1. Beiträge zur DGMK-Fachbereichstagung Konversion von Biomasse. Rotenburg a. d. Fulda. März 2012.
- [17] Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. Endbericht zur EEG-Periode 2009 bis 2011. Deutsches Biomasseforschungszentrum. März 2012